

УДК 697

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИФFUЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ

Соколов В.И.

CRITERION ANALYSIS OF DIFFUSIVE PROCESSES IN VENTILATION SYSTEMS

Sokolov V.I.

Проведен анализ критериальных соотношений для диффузионных процессов в газовых потоках цилиндрических каналов вентиляционных систем. Для коэффициента турбулентной диффузии использовано эмпирическое выражение Хинце, а для коэффициента сопротивления трения универсальная формула Альтишуля. Получена зависимость диффузионного числа Пекле от числа Рейнольдса. Обосновано наличие и установлена граница автомодельной зоны в диффузионных процессах. Показано, что изменение диффузионного числа Пекле для диапазона значений чисел Рейнольдса $Re > 1,3 \cdot 10^5$ составляет не более 5% при значениях относительной шероховатости $\bar{\Delta}$ свыше 0,001.

Ключевые слова: вентиляционная система, диффузионный процесс, число Шмидта, число Рейнольдса, диффузионное число Пекле.

Постановка проблемы. Проектирование и разработка вентиляционных систем, охлаждающих устройств, теплосиловых установок связано с расчетом процессов диффузии аэрозолей в турбулентных газовых потоках [1 – 3]. Кроме того, анализ процессов диффузии примесей в газовых потоках является определяющим при измерениях выбросов через вентиляционные системы промышленных предприятий, шахт, энергоблоков атомных станций, при разработке систем теплогазоснабжения и т.п. Достоверный контроль параметров промышленных выбросов позволяет рационально решать вопросы по модернизации вентиляционных систем и коррекции технологических процессов, предотвращать аварийные ситуации, разрабатывать мероприятия по повышению экологической безопасности.

Анализ последних исследований и публикаций. Диффузия примеси в турбулентном газовом потоке является сложным нестационарным процессом [1, 2], описываемым дифференциальными уравнениями в частных производных. Примесью называют «постороннее вещество» [2, 3], содержащееся в сравнительно небольшом количестве в объемах газовой среды.

«Постороннее вещество» содержится в виде жидких, твердых или газообразных объектов (включений). Если наличие примеси не оказывает влияние на физические свойства газовой среды и на формирование поля скорости в турбулентном потоке, то такую примесь считают пассивной. В случае пассивной примеси характеристики турбулентного потока, измеренные в потоке «чистой» (не содержащей рассматриваемую примесь) среды, можно использовать для расчета движения частиц этой примеси в пространстве, занятым таким же потоком, несущим примесь. Ввиду сложности исследования диффузионных процессов в инженерной практике нашли применения как аналитические, так и полуэмпирические методы исследования [1,3].

Цель статьи. Целью работы является исследование диффузионных процессов в турбулентных газовых потоках цилиндрических каналов вентиляционных систем на основе анализа критериальных соотношений.

Материалы и результаты исследования. Актуальной (мгновенной местной) концентрацией примеси является величина [1-3]

$$C(x, y, z, t) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m_n}{\Delta V}, \quad (1)$$

где ΔV - некоторый малый объем части пространства, выделенный вокруг точки с координатами x, y, z ; Δm_n - масса примеси, которая находится в этом объеме в момент времени t .

Актуальная концентрация в каждой точке пространства, занятого турбулентным потоком, претерпевает беспорядочные изменения во времени (пульсирует, флуктуирует). При решении практических задач о движении частиц примеси от актуальной характеристики переходят к осредненному значению концентрации. В случае установившегося турбулентного движения и

стационарных внешних условий используется введенное Рейнольдсом временное осреднение

$$\langle C(x, y, z) \rangle = \frac{1}{t_0} \int_t^{t+t_0} C(x, y, z) dt, \quad (2)$$

где t_0 - выбранный соответствующим образом интервал времени.

Стационарная диффузия газовых примесей в каналах вентиляционных систем может быть описана уравнением турбулентной диффузии примеси в однородной несжимаемой среде [3], которое в декартовой системе координат имеет вид (индекс "<...>" осредненного значения в дальнейшем опускаем)

$$u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \frac{\partial C}{\partial z} = f(x, y, z) + D_e \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

где $f(x, y, z)$ - объемная плотность мощности источников молекул примеси; D_e - коэффициентом вихревой (турбулентной) диффузии.

Коэффициент турбулентной диффузии устанавливают или на основе экспериментальных данных, или на дополнительных гипотезах. Отметим известную эмпирическую формулу для круглых труб, приведенную в работе Хинце [4]

$$D_e = 0,02 u_0 d \sqrt{\lambda}. \quad (4)$$

Здесь u_0 - скорость потока в трубе, d - диаметр трубы, λ - коэффициент гидравлического сопротивления трения. Данное выражение

$$D_e = 0,02 u_0 d \sqrt{\lambda} = 0,02 \frac{u_0 d}{v} v \sqrt{\lambda}$$

или

$$D_e = 0,02 \text{Re} v \sqrt{\lambda}. \quad (5)$$

где Re - число Рейнольдса.

Коэффициент гидравлического сопротивления трения λ при турбулентном режиме течения достаточно точно определяется по универсальной формуле Альтшуля [5, 6]

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

где Δ - абсолютная шероховатость внутренней поверхности канала.

Вводим безразмерные скорости, координаты и концентрацию

$$\bar{u}_x = u_x / u_0; \quad \bar{u}_y = u_y / u_0, \quad \bar{u}_z = u_z / u_0; \\ \bar{x} = x / d_e, \bar{y} = y / d_e, \bar{z} = z / d_e; \quad \bar{C} = C / C_o;$$

где C_o - масштаб концентрации примеси в канале; d_e - гидравлический диаметр, величина которого для каналов некруглой формы равна $d_e = 4S/\Pi$ (S - площадь поперечного сечения, Π - его периметр).

Уравнение диффузии для безразмерных переменных приводим к виду

$$\bar{u}_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}} + \bar{u}_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{y}} + \bar{u}_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{z}} = \bar{f}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) + \frac{1}{\text{Re} Sc} \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{z}^2} \right). \quad (7)$$

Здесь число Шмидта (или диффузионное число Прандтля)

$$Sc = \text{Pr}_\delta = \frac{\nu}{D_e}, \quad (8)$$

а выражение

$$\bar{f}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = \frac{d_e}{u_o C_o} f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$$

есть безразмерная объемная плотность мощности источников молекул примеси.

Как следует из уравнения (7) длина пути выравнивания концентрации примеси в канале определяется параметрами газового потока, которые можно задать двумя безразмерными критериями: числом Рейнольдса Re и Шмидта Sc ; а также характером источника примеси и формой канала.

В случае стационарного диффузионного процесса и источника примеси молекул геометрические параметры процесса будут зависеть от произведения числа Рейнольдса на число Шмидта, которое принято называть диффузионным числом Пекле

$$Pe_\delta = \text{Re} Sc. \quad (9)$$

Свяжем число Шмидта с числом Рейнольдса, для чего в (8) подставим (5)

$$Sc = \frac{\nu}{D_e} = \frac{50}{\text{Re} \sqrt{\lambda}},$$

а затем сюда выражение (6)

$$Sc = \frac{50}{Re \sqrt{0,11 \left(\frac{\Delta}{d_z} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}}} = \frac{151}{Re(\bar{\Delta} + 68/Re)^{0,125}}, \quad (10)$$

где относительная шероховатость внутренней поверхности канала $\bar{\Delta} = \Delta/d_z$.

Подстановка (10) в (9) дает

$$Pe_d = 151(\bar{\Delta} + 68/Re)^{-0,125}. \quad (11)$$

Зависимость диффузионного числа Пекле от числа Рейнольдса представлена на рис. 1. Приведенный результат показывает, что при больших значениях относительной шероховатости величина диффузионного числа Пекле не зависит от числа Рейнольдса. Это означает наличие в диффузионных процессах автомодельной зоны, когда длина пути выравнивания концентрации примеси не будет зависеть от параметров газового потока. Анализируя установленные зависимости можно утверждать, что изменение диффузионного числа Пекле для диапазона значений чисел Рейнольдса $Re > 1,3 \cdot 10^5$ составляет не более 5% при значениях относительной шероховатости $\bar{\Delta}$ свыше 0,001.

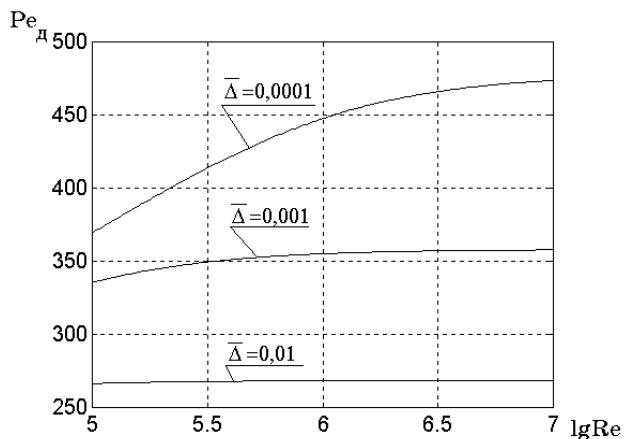


Рис. 1. Зависимость диффузионного числа Пекле от числа Рейнольдса

Выводы. Таким образом, на основе полуэмпирических зависимостей для коэффициента турбулентной диффузии и коэффициента сопротивления трения проведен анализа критериальных соотношений для диффузионных процессов в газовых потоках в цилиндрических каналах вентиляционных систем. Показано наличие и установлена граница автомодельной зоны в диффузионных процессах.

Л и т е р а т у р а

1. Недопекин Ф.В. Диффузионные процессы в стационарных газовых потоках / Ф.В. Недопекин, А.А. Коваленко, В.И. Соколов, Г.С. Калюжный, Н.Д. Андрийчук. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2007. – 224 с.
2. Retherford Aris. Introduction to the Analysis of Chemical Reactors. Departments of Chemical Engineering University of Minnesota. Prentice - Hall. Inc., New Jersey, 1967. - 340 p.
3. Соколов В.И. Инженерные задачи диффузии примеси в потоке / В.И. Соколов, А.А. Коваленко, Г.С. Калюжный, С.А. Минин. – Луганск: ВУГУ, 2000 – 168 с.
4. Хинце И.О. Турбулентность. - М.: Физматгиз, 1963. - 680 с.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М.: Энергоиздат, 1960. - 463 с.
6. Коваленко А.А. Основы технической механики жидкостей и газов: учебное пособие для вузов / А.А. Коваленко, В.И. Соколов, А.Х. Дымнич, П.Е. Уваров. - Луганск: ВУГУ, 1998. - 272 с.

R e f e r e n c e s

1. Diffusion processes in stationary gas flows / F.V. Nedopyokin [etc.]. - Lugansk: Publishing house of Volodymyr Dal East-Ukrainian National University, 2007. - 224 p.
2. Retherford Aris. Introduction to the Analysis of Chemical Reactors. Departments of Chemical Engineering University of Minnesota. Prentice - Hall. Inc., New Jersey, 1967. - 340 p.
3. Engineering problems of impurity diffusion in the flow / V.I. Sokolov [etc.]. - Lugansk: Publishing house of Volodymyr Dal East-Ukrainian National University, 2000. - 168 p.
4. I.O. Hinze. Turbulence. – M.: Phizmatgiz, 1963. – 680 p.
5. I.E. Idelchik. Handbook of hydraulic resistance. – M.: Energoizdat, 1960. – 463 p.
6. Fundamentals of Technical Mechanics of fluids: a manual for schools / A.A. Kovalenko [etc.]. - Lugansk: Publishing house of Volodymyr Dal East-Ukrainian National University, 1998. - 272 p.

Соколов В.І. Критеріальний аналіз дифузійних процесів в системах вентиляції

Проведений аналіз критеріальних співвідношень для дифузійних процесів в газових потоках циліндричних каналів вентиляційних систем. Для коефіцієнта турбулентної дифузії використаний емпіричний вираз Хінце, а для коефіцієнту опору тертя універсальна формула Альтиуля. Обґрунтована наявність та встановлена границя автомодельної зони в циліндричних каналах. Показано, що зміна дифузійного числа Пекле для діапазону чисел Рейнольдса $Re > 1,3 \cdot 10^5$ складає не більш 5% при значеннях відносної шероховатості $\bar{\Delta}$ понад 0,001.

Ключові слова: вентиляційна система, дифузійний процес, число Шмідта, число Рейнольдса, дифузійне число Пекле.

Sokolov V.I. Criterion analysis of diffusive processes in ventilation systems

The analysis of criterion correlations for diffusive processes in gas streams in the cylindrical ductings of vent systems are conducted. A presence is shown and the border of automodel area is set in diffusive processes.

Key words: *Ventilation system, diffusive process, Schmidt's number, Reynolds number, diffusive Pellets number.*

Соколов В.І. – декан факультету машинознавства та електромеханіки, завідувач кафедри машинобудування, верстатів та інструментів Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Рецензент: **Осенін Ю.І.**, д.т.н., проф.

Стаття подана 05.10.2015